

## SIMULASI WAKTU PERAMBATAN DAN TINGGI GELOMBANG TSUNAMI AKIBAT MELETUSNYA GUNUNG ANAK KRAKATAU

Ahmad Zakaria<sup>1</sup> Kartini Susilowati<sup>2</sup>

1. Laboratorium Hidrolika dan Mekanika Fluida, Jurusan Teknik Sipil,  
Fakultas Teknik, Universitas Lampung,  
Bandar Lampung, Indonesia, 35145  
e-mail:ahmadzakaria@unila.ac.id
2. Dosen Jurusan Teknik Sipil Universitas Lampung

### Abstrak

Model numerik perambatan gelombang panjang digunakan untuk memodelkan perambatan gelombang tsunami, baik yang disebabkan oleh gempa tektonik maupun gempa vulkanik atau akibat meletusnya gunung berada di laut. Pada penelitian ini dipresentasikan simulasi perambatan gelombang tsunami akibat meletusnya gunung anak Krakatau dengan kekuatan yang sama dengan kekuatan Krakatau tahun 1883. Diasumsikan sumber tsunami sama dengan lokasi gunung anak Krakatau sekarang. Dari lokasi tersebut gelombang tsunami merambat menuju pantai Provinsi Lampung. Persamaan gelombang panjang non linier dua dimensi (2-D) dengan solusi pendekatan beda hingga metode eksplisit (*explicit finite-difference method*) dapat dipergunakan untuk mensimulasikan perambatan gelombang tsunami. Gelombang tsunami setinggi lebih dari 12 meter dapat mencapai lokasi rencana pembangunan Jembatan Selat Sunda dalam waktu 35 menit.

**Kata kunci :** *gelombang panjang, pendekatan beda hingga, anak Krakatau*

### 1. PENDAHULUAN

Provinsi Lampung merupakan provinsi dimana wilayahnya dekat dengan Gunung Anak Krakatau. Karenanya pesisir pantai Provinsi Lampung rawan terhadap bencana tsunami, apabila Gunung Anak Krakatau meletus seperti 125 tahun yang lalu. Bencana tsunami juga pernah dialami oleh masyarakat yang tinggal di wilayah pesisir pantai provinsi Lampung, akibat meletusnya Gunung Krakatau pada tanggal 26-27 Agustus 1883, yang menelan korban jiwa lebih kurang 36.000 orang. Saat kejadian, tinggi muka air laut di wilayah pantai kota Bandar Lampung dapat mencapai 22 meter (Mahi dan Zakaria, 2008). Oleh karena itu kemungkinan terulangnya kejadian tsunami seperti di tahun 1883 silam adalah sangat mungkin karena, sejak tahun 1927 sampai tahun 2005, yaitu selama 75 tahun ketinggian Gunung Anak Krakatau ini sudah mencapai 315 meter. Selain itu, tanggal 26 Oktober 2007, badan PVBMG pernah menetapkan kondisi gunung ini dalam status Siaga/level III, hal ini karena kondisi aktivitas vulkaniknya cukup tinggi. Ini menunjukkan bahwa resiko akan meletusnya gunung ini dalam waktu dekat adalah mungkin (Mahi dan Zakaria, 2008). Akan tetapi karena tuntutan perkembangan kota dan provinsi di Sumatra pada umumnya dan Lampung pada khususnya, pembangunan Jembatan Selat Sunda (JSS) perlu dilakukan secepatnya. Sehingga, informasi tinggi dan waktu perambatan gelombang tsunami untuk mengukur resiko bencana terhadap konstruksi jembatan perlu diketahui.

Untuk dapat memperkirakan resiko tsunami bila Gunung Anak Krakatau meletus dapat dilakukan dengan berbagai cara, salah satunya dengan mensimulasikan gelombang tsunami secara numerik. Pemodelan simulasi gelombang tsunami sudah banyak dilakukan peneliti, baik akibat gempa vulkanik maupun tektonik. Untuk dapat pemodelan tsunami sudah

pernah dilakukan oleh Goto dan Shuto (1983), Goto dan Ogawa (1992), Kowalik dan Murty (1993), Marchuk dkk (2001), Horrillo dkk (2004, 2006), Watts dkk (2003, 2005), Shigihara dkk (2005), Kowalik dan Proshutinsky (2006). Untuk pemodelan tsunami akibat gempa vulkanik juga pernah dilakukan, antara lain oleh Kawamata dkk (1993) Hantoro dkk (2007). Disini Hantoro dkk (2007) melakukan pengkajian ulang peristiwa tsunami yang ditimbulkan akibat Krakatau tahun 1883. Dalam pemodelan simulasi tsunami persamaan hidrodinamik dengan pendekatan eksplisit beda hingga akurasi order 2 dipergunakan.

Pada penelitian ini, persamaan perambatan gelombang panjang non linier dua dimensi (2-D) dikembangkan untuk mensimulasikan perambatan gelombang permukaan di laut dangkal. Simulasi numerik dari perambatan gelombang non linier dua dimensi (2-D) juga dipergunakan Kreyszig (1993). Pada penelitiannya Kreyszig (1993) mendiskusikan masalah perambatan gelombang satu dimensi. Pembahasan lain mengenai perambatan gelombang non linier dua dimensi juga dipresentasikan oleh Horrillo dkk (2006) yang mempelajari masalah dispersi dari run up gelombang dua dimensi.

## **2. METODOLOGI PENELITIAN**

Pendekatan penelitian yang dipergunakan di dalam studi ini adalah dengan menggunakan pendekatan numerik. Dengan pendekatan numerik, biaya yang dibutuhkan menjadi lebih murah dibandingkan menggunakan pemodelan fisik.

Pada penelitian ini, persamaan gelombang panjang non linier dua dimensi (2-D) diaplikasikan untuk memodelkan perambatan gelombang tsunami ini sama dengan yang dipergunakan Kreyszig (1993) dan Horrillo dkk (2006).

Untuk mensimulasikan perambatan gelombang non linier dua dimensi (2-D), persamaan momentum gerak gelombang permukaan dan persamaan kontinuitas dapat dipresentasikan sebagai berikut,

a. Persamaan momentum,

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} - r.u.f \quad (\text{Pers. 1})$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial y} + u \frac{\partial v}{\partial x} = -g \frac{\partial \eta}{\partial y} - r.v.f \quad (\text{Pers. 2})$$

b. Persamaan kontinuitas

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = -\frac{\partial(Du)}{\partial x} - \frac{\partial(Dv)}{\partial y} \quad (\text{Pers. 3})$$

Dimana:

$$f = \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{D}$$

$\eta$  = elevasi dari permukaan air

$r$  = koefisien gesek = 0.025

- $h$  = kedalaman air  
 $u$  = kecepatan gelombang arah x  
 $v$  = kecepatan gelombang arah y  
 $g$  = percepatan gravitasi  
 $D$  = kedalaman air total  
 $D = h + \eta$   
 $\Delta t$  = step waktu = 0,01 detik  
 $\Delta x = \Delta y$  = grid ruang = 850 meter

Solusi dari persamaan perambatan gelombang non linier dua dimensi yang dipergunakan untuk penelitian ini adalah menggunakan pendekatan beda hingga metode eksplisit. Dengan metode ini, pendekatan dilakukan menggunakan akurasi orde dua sebagai berikut,

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{u_{i,j}^{k+1} - u_{i,j}^k}{\Delta t} \quad (\text{Pers. 4})$$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} = u_{i,j}^k \left( \frac{u_{i+1,j}^k - u_{i,j}^k}{\Delta x} \right) \quad (\text{Pers. 5})$$

$$v \frac{\partial u}{\partial y} = v_{i,j}^k \left( \frac{u_{i,j+1}^k - u_{i,j}^k}{\Delta y} \right) \quad (\text{Pers. 6})$$

$$g \frac{\partial \eta}{\partial x} = g \left( \frac{\eta_{i+1,j}^k - \eta_{i,j}^k}{\Delta x} \right) \quad (\text{Pers. 7})$$

$$r.u.f = r.u_{i,j}^k \cdot \frac{\sqrt{(u_{i,j}^k)^2 + (v_{i,j}^k)^2}}{D_{i,j}^k} \quad (\text{Pers. 8})$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = \frac{v_{i,j}^{k+1} - v_{i,j}^k}{\Delta t} \quad (\text{Pers. 9})$$

$$v \frac{\partial v}{\partial y} = v_{i,j}^k \left( \frac{v_{i,j+1}^k - v_{i,j}^k}{\Delta y} \right) \quad (\text{Pers. 10})$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} = u_{i,j}^k \left( \frac{v_{i+1,j}^k - v_{i,j}^k}{\Delta x} \right) \quad (\text{Pers. 11})$$

$$g \frac{\partial \eta}{\partial y} = g \left( \frac{\eta_{i,j+1}^k - \eta_{i,j}^k}{\Delta y} \right) \quad (\text{Pers. 12})$$

$$r.v.f = r.v_{i,j}^k \cdot \frac{\sqrt{(u_{i,j}^k)^2 + (v_{i,j}^k)^2}}{D_{i,j}^k} \quad (\text{Pers. 13})$$

$$D_{i,j}^k = h_{i,j} + \eta_{i,j}^k \quad (\text{Pers. 14})$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{\eta_{i,j}^{k+1} - \eta_{i,j}^k}{\Delta t} \quad (\text{Pers. 15})$$

$$\frac{\partial(Du)}{\partial x} = D_{i,j}^k \left( \frac{u_{i,j}^k - u_{i-1,j}^k}{\Delta x} \right) + u_{i,j}^k \left( \frac{D_{i,j}^k - D_{i-1,j}^k}{\Delta x} \right) \quad (\text{Pers. 16})$$

$$\frac{\partial(Dv)}{\partial y} = D_{i,j}^k \left( \frac{v_{i,j}^k - v_{i,j-1}^k}{\Delta y} \right) + v_{i,j}^k \left( \frac{D_{i,j}^k - D_{i,j-1}^k}{\Delta y} \right) \quad (\text{Pers. 17})$$

Pada kenyataannya perambatan gelombang permukaan sebenarnya dibatasi suatu batas yang secara fisik tidak nyata. Ini disebut sebagai *non physical boundaries* atau sering disebut dengan batas terbuka (*open boundaries*). Untuk mensimulasikan perambatan gelombang yang dapat melewati batas tersebut, manipulasi persamaan matematika dipergunakan. Persamaan ini dimaksudkan untuk menghilangkan refleksi gelombang pada batas tersebut. Untuk itu sejumlah teknik dikembangkan, dimana masing-masing metode mempunyai kelebihan dan kekurangan.

Pada penelitian ini, metode kondisi batas yang dipergunakan adalah kondisi batas metode *transparent boundaries*. Kondisi batas dimaksudkan untuk mereduksi gelombang yang merambat melewati batas domain perhitungan numeriknya karena pada batas tersebut refleksi gelombang tidak diperkenankan. Persamaan yang dipergunakan untuk kondisi batas sebagaimana diperkenalkan Reynolds (1978),

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + c \frac{\partial \eta}{\partial x} = 0 \quad (\text{Pers. 18})$$

Menggunakan Persamaan (18), refleksi gelombang dari perhitungan numerik dapat direduksi. Dengan mempergunakan persamaan gelombang panjang non linier dan metode kondisi batas transparan Reynolds (1978), perambatan gelombang.

### **Setting Model**

Sumber gelombang berupa gelombang titik, ini berupa gelombang tunggal. Ricker wavelet dipergunakan sebagaimana sumber gelombang tsunami (Zakaria, 2003). Pada penelitian ini, untuk memodelkan perambatan gelombang, dipergunakan skenario seperti dipresentasikan dalam peta (lihat Gambar 1). Skema numerik yang dipergunakan untuk mensimulasikan perambatan gelombang tsunami akibat meletusnya gunung anak Krakatau adalah sebagaimana dipresentasikan dalam Gambar 1. Bathymetri yang dipergunakan untuk simulasi numerik diambil dari GEBCO, dimana data mempunyai akurasi 30 detik (0,5 menit) dengan lebar grid  $\Delta x = \Delta y = 850$  meter. Dimana lokasi gunung anak Krakatau diasumsikan sama dengan lokasi sumber gelombang tsunami, yaitu pada posisi 6°06'00" Lintang Selatan dan 105°24'00" Bujur Timur. Tinggi gelombang pada posisi tersebut diasumsikan 200 meter. Prediksi kejadian meletusnya gunung anak Krakatau mempunyai kekuatan yang sama dengan dengan tinggi gelombang pada kejadian meletusnya gunung Krakatau tahun 1883. Untuk jumlah grid dari 5°20'24" Lintang Selatan s/d 6°42'30" Lintang Selatan, 105°19'30" Bujur Timur s/d 106°09'00" Bujur Timur di dalam model ini banyaknya adalah 181  $\times$  181 grid.

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

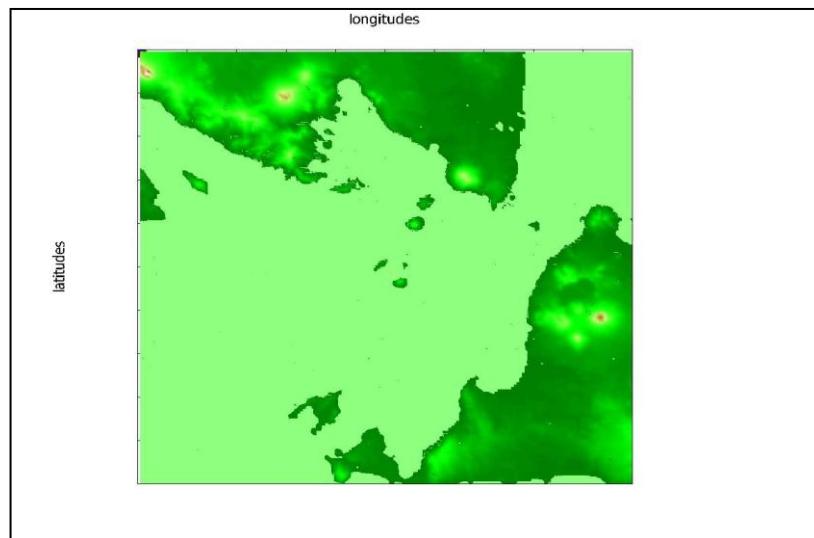
Hasil dari penelitian ini dipresentasikan dalam bentuk perambatan gelombang tsunami pada waktu perambatan  $t$  sama dengan 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, dan 80 menit sebagaimana dipresentasikan seperti dalam Gambar 1, Gambar 3, Gambar 4, Gambar 5, Gambar 6, Gambar 7, dan Gambar 8. Hasil penelitian yang sudah dilakukan oleh Hantoro dkk (2007) dan Zakaria (2009) adalah berupa waktu perambatan gelombang tsunami akibat meletusnya gunung Krakatau seperti dalam Tabel 1 berikut,

Tabel 1. Waktu perambatan gelombang tsunami

Lokasi	Hantoro dkk (2007)	Zakaria (2009)	Hasil Penelitian
Teluk Betung	79 menit	83 menit	
Merak	52 menit	58 menit	
Lokasi JSS	-	-	35 menit

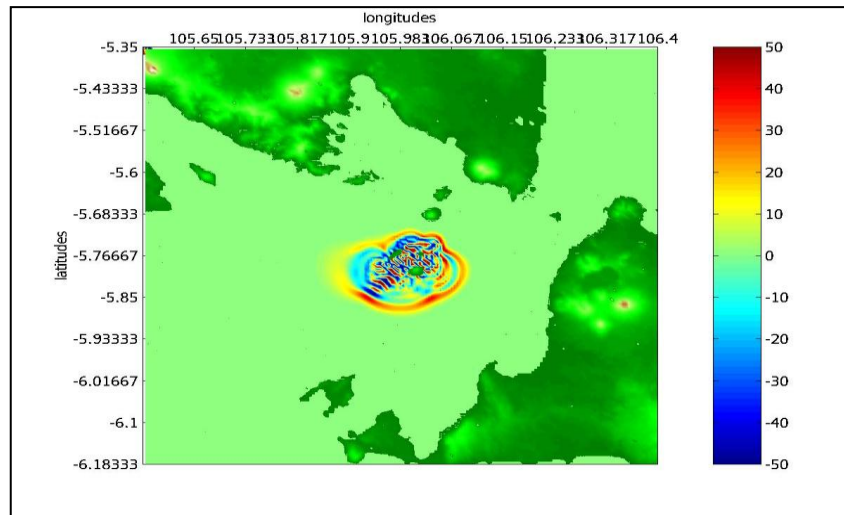
Dari hasil penelitian ini juga didapat bahwa tinggi gelombang tsunami pada lokasi rencana pembangunan Jembatan Selat Sunda dapat mencapai tinggi lebih dari 12 meter dengan waktu perambatan 35 menit.

Peta situasi perambatan gelombang tsunami dapat dilihat pada Gambar 1 berikut,

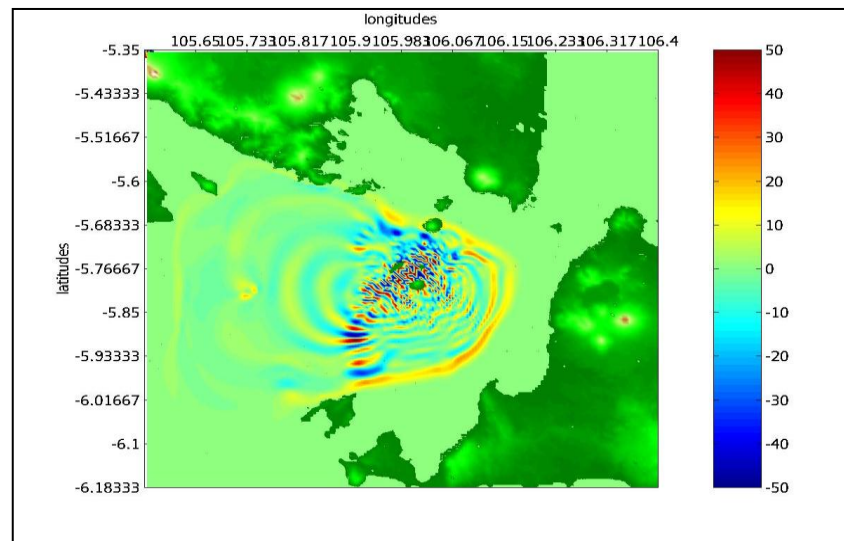


Gambar 1. Peta situasi daerah perambatan gelombang tsunami

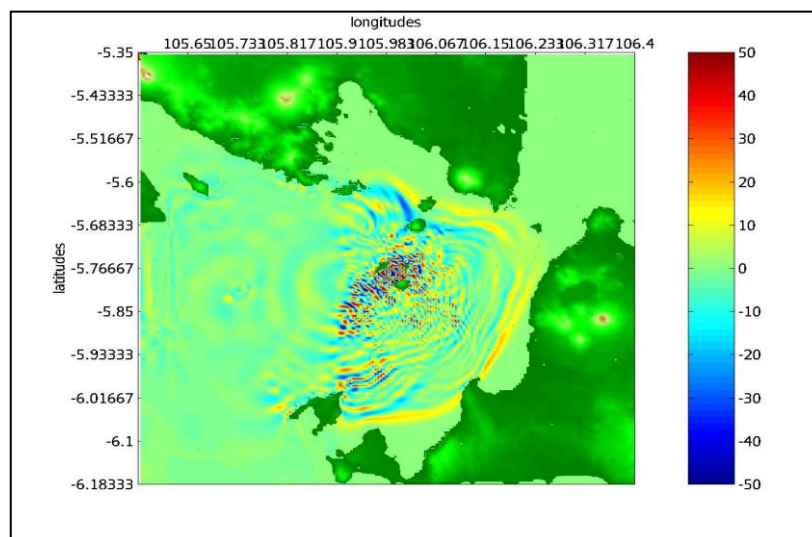
Gambar perambatan gelombang tsunami untuk waktu perambatan ( $t$ ) sama dengan 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 menit dapat dilihat pada Gambar 2 s/d Gambar 8 berikut,



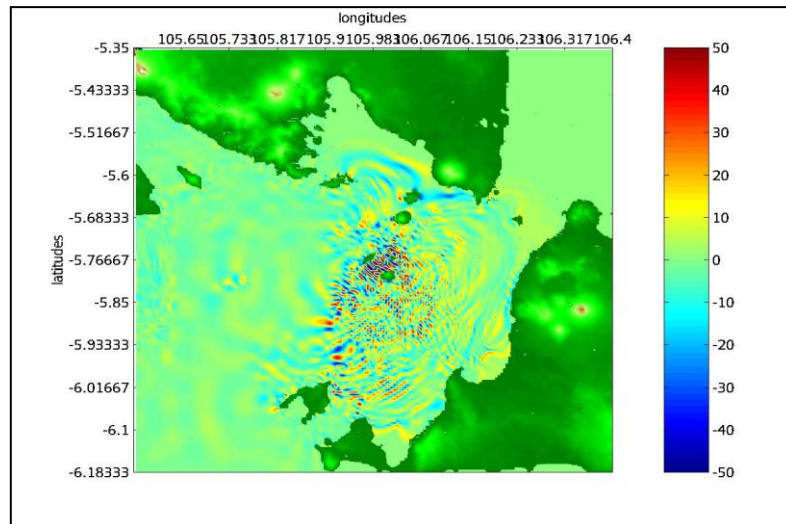
Gambar 2. Perambatan gelombang tsunami pada waktu  $t = 10$  menit.



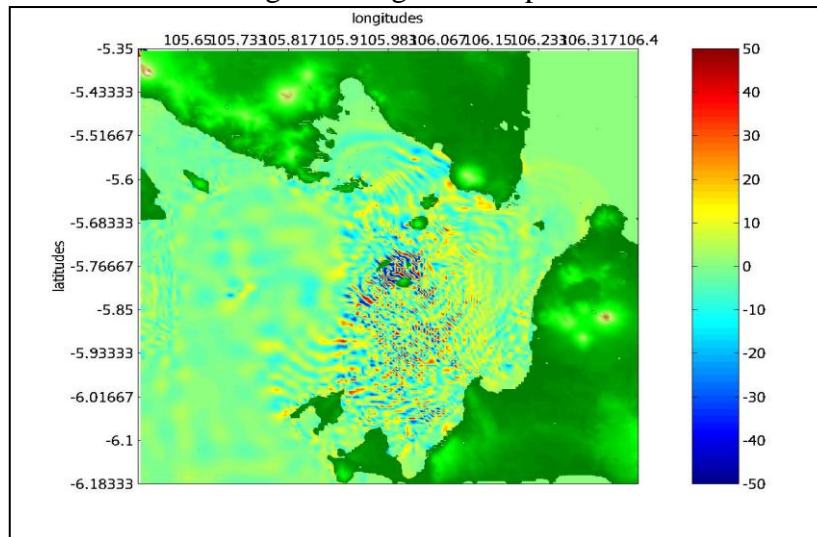
Gambar 3. Perambatan gelombang tsunami pada waktu  $t = 20$  menit.



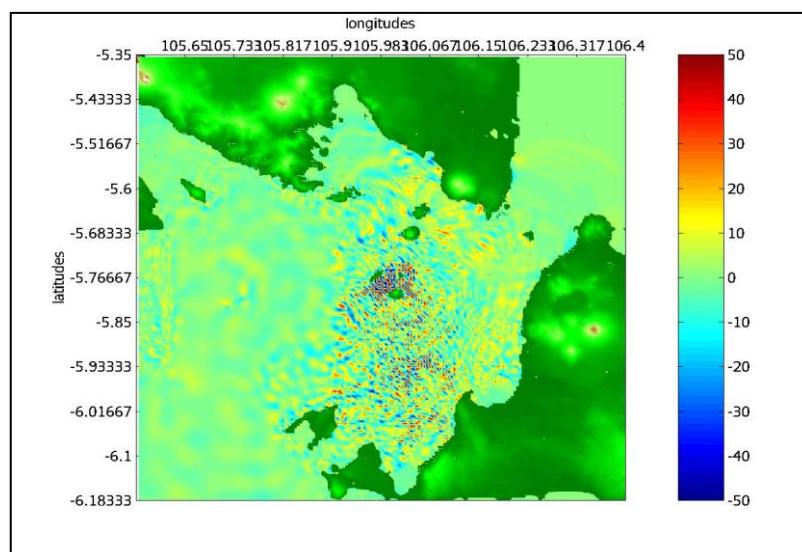
Gambar 4. Perambatan gelombang tsunami pada waktu  $t = 30$  menit.



Gambar 5. Perambatan gelombang tsunami pada waktu  $t = 40$  menit.

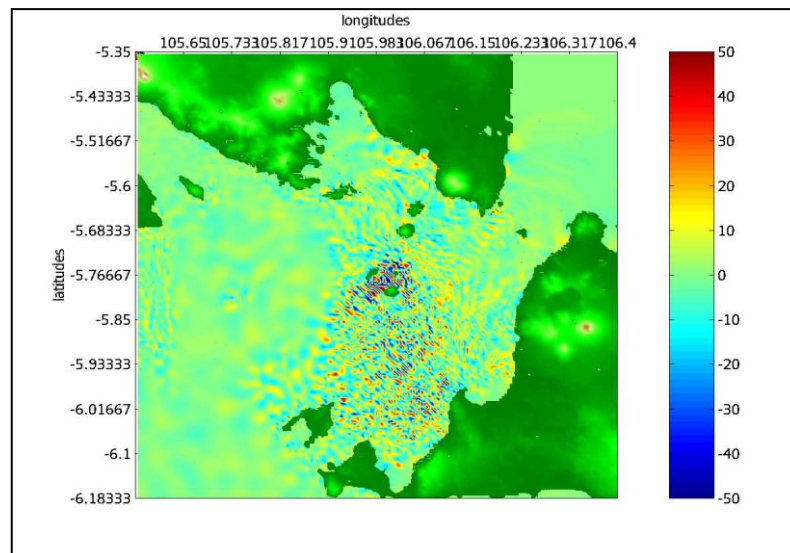


Gambar 6. Perambatan gelombang tsunami pada waktu  $t = 50$  menit.



Gambar 7. Perambatan gelombang tsunami pada waktu  $t = 1$  jam.





Gambar 8. Perambatan gelombang tsunami pada waktu  $t = 1$  jam 20 menit.

Berdasarkan hasil penelitian yang dipresentasikan Gambar 2 sampai dengan Gambar 8 menunjukkan perambatan gelombang tsunami untuk setiap waktu  $t$  mulai dari 10 menit sampai dengan 80 menit. Dari penelitian dihasilkan 100 gambar simulasi perambatan gelombang tsunami, tetapi yang dipresentasikan dalam penelitian ini adalah hanya 8 gambar saja. Sumber gelombang yang dipergunakan untuk mensimulasikan letusan gunung anak Krakatau adalah berupa sumber gelombang titik dengan tipe Ricker wavelet. Signal atau gelombang yang disimulasikan ini adalah merupakan gelombang tunggal. Dengan menggunakan Ricker wavelet, gelombang yang dihasilkan lebih halus bila dibandingkan dengan gelombang sinus. Dari posisi koordinat  $6^{\circ}06'00''$  Lintang Selatan dan  $105^{\circ}24'00''$  Bujur Timur, gelombang tsunami dengan ketinggian 200 meter merambat ke pantai provinsi Lampung. Dalam perambatannya gelombang terhalang oleh pulau-pulau disekitarnya, sehingga gelombang tsunami yang merambat terdispersi. Warna merah dengan skala maksimum 50 dan warna biru dengan skala minimum 50 menunjukkan maksimum dan minimum amplitudo gelombang tsunami, sedangkan warna hijau menunjukkan topografi atau ketinggian permukaan tanah.

Hasil penelitian yang dilakukan Hantoro dkk (2007) dan Zakaria (2009) ini dibandingkan dan menunjukkan bahwa waktu perambatan gelombang tsunami, yang mempresentasikan waktu perambatan gelombang tsunami mencapai pantai provinsi Lampung dan provinsi Banten menunjukkan kecocokan dan ini dipresentasikan dalam Tabel 1. Hasil penelitian ini dibandingkan dengan penelitian di atas dan ini menunjukkan bahwa gelombang setinggi lebih dari 12 meter merambat dan membutuhkan waktu 35 menit untuk mencapai lokasi tempat direncanakannya pembangunan JSS.

#### **4. KESIMPULAN**

Berdasarkan hasil penelitian ini dapat disimpulkan bahwa gelombang tsunami dengan tinggi 12 meter dapat mencapai lokasi rencana JSS dalam waktu 35 menit. Persamaan gelombang panjang non linier dua dimensi dan dengan pendekatan beda hingga dapat dipergunakan untuk mensimulasikan perambatan gelombang tsunami akibat meletusnya gunung anak Krakatau.



## **DAFTAR PUSTAKA**

- Goto, C. dan Shuto, 1983, Numerical simulation of tsunami propagations and run-up, In Tsunami-Their Science and Engineering, edited by K. Iida and T. Iwasaki, pp. 439-451. Terra Scientific Publ. Comp.; Tokyo.
- Goto, C. dan Ogawa, Y., 1992, Numerical method of tsunami simulation with leap-frog scheme, Disaster Control Research Center, Tohoku University.
- Horrillo J. J., Kowalik, Z. and Kornkven, E., 2004, The third international workshop on long-wave runup models, report.
- Horrillo, J., Kowalik, Z. Shigihara, Y., 2006, Wave dispersion study in the indian ocean-tsunami of december 26, 2004, Marine Geodesy, Vol. 29, pp.149-166.
- Hantoro, W. S., Latief, H., Susilohadi, and Airlangga, A.Y., 2007, Volcanic tsunami of krakatau: chronology model and its mitigation in sunda strait, Proceedings of International Symposium on Geotechnical Hazards: Prevention, Mitigation and Engineering Response. pp.331-354.
- Kreyszig, E., 1993, *Advanced Engineering Mathematics*, John Wiley & Sons, Inc. Singapore.
- Kowalik, Z., Proshutinsky T. dan Proshutinsky, A., 2006, Tide-tsunami interactions, Science of Tsunami Hazards, Vol. 24, No. 4, pp.242-256.
- Kowalik, Z. and Murty, T. S., 1993, Numerical simulation of two-dimensional tsunami runup, Marine Geodesy, Vol.16, pp.87-100.
- Mahi, A. K., Zakaria, A., 2008, Rencana strategis dan rencana aksi mitigasi bencana Kota Bandar Lampung, Laporan Proyek, DKP Profinsi Lampung, 156 hal.
- Marchuk, Andrei J. dan Anisimov, A., 2001, A method for numerical modeling run-up on the coast of an arbitrary profile, ITS 2001 Proceedings, Session 7, Number 7-27.
- Reynold, A. C., 1978, Boundary conditions for the numerical solution of wave propagation problems, Geophysics 43(6), pp 1099-1110.
- Shigihara, Y., K. Fujima, M. Homma and K. Saito, 2005, Numerical methods of linear dispersive wave equation for the practical problems, Asian and Pacific Coasts, Sept.4-8, Jeju, South Korea, pp.14.
- Watts, P Grill, S.T., Kirby, J. T., Fryer G. J., and Tappin, D. R., 2003, Landslide., tsunami case studies using a boussinesq model and a fully nonlinear tsunami generation model, Natural Hazards and Earth System Sciences, Vol. 3, pp.391-402.
- Watts, P., Ioualalen, M., Grill, S., Shi, F. dan Kirby, J. T., 2005, Numerical simulation of December 26, 2004 Indian ocean tsunami using higher order boussinesq model, Ocean waves measurement and analysis, Fifth International Symposium WAVES 2005, 3rd July, 2005, Madrid, Spain, No. 221.
- Zakaria, A. 2009, Simulasi perambatan gelombang tsunami akibat meletusnya gunung anak krakatau, Seminar Sains MIPA Aplikasinya, FMIPA UNILA, 16 - 17 November 2009, pp. 235-246.
- Zakaria, A., 2003, Numerical modelling of wave propagation using higher order finite-difference formulas, Thesis (Ph.D), Curtin University of Technology, Perth, W.A.